

文章编号: 1000-7709(2019)03-0080-04

高温差区钢塑复合管道层间脱粘特性分析

卢 希¹, 徐 港¹, 高德军¹, 邹汉文²

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北送变电工程有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 针对埋设于高温差地区的钢塑复合管易出现层间脱粘的问题, 基于粘聚区模型建立了钢塑复合管道层间脱粘的计算模型, 通过结合强度试验获取并校准 cohesive 接触参数, 应用该套参数建立 DN50 钢塑复合管道的有限元模型, 对钢塑复合管道因受到融沉破坏而导致复合层脱粘的行为进行了仿真分析, 给出了管道支座设置数量的合理化建议, 为高温差地区钢塑复合管道的铺设提供了参考。

关键词: 衬塑钢管; 粘聚区模型; 有限元分析; 融沉破坏

中图分类号: TU744

文献标志码: A

1 引言

钢塑复合管道因其耐腐蚀、卫生性能好等优点^[1]而被广泛使用, 但因塑料管和钢管的线膨胀系数相差较大及塑料管残余应力的存在, 钢管与塑料管的收缩量不同, 导致在高温差地区使用时易出现层间脱粘问题, 对生产生活、环境等带来不利影响。由于现有研究主要在材料层面上展开小试样的加速劣化试验^[2-4], 结论的工程适用性尚存置疑。对此, 本文通过结合强度试验获取接触参数, 基于复合材料粘聚区模型, 对衬塑钢管的层间粘结失效过程进行仿真分析, 探究了防止埋设于季节性冻土层管道融沉破坏的方法, 并给出了管道支座设置数量的合理化建议, 以期在高温差地区钢塑复合管道的铺设提供参考。

2 仿真分析模型

2.1 基本参数

钢塑复合管以镀锌钢管为基管, 塑料管与钢管之间使用粘接剂热熔粘接, 其中钢管、PE 钢管的弹性模量分别为 2×10^5 、750 MPa; 泊松比分别为 0.3、0.4; 热膨胀系数分别为 1.2×10^{-5} 、 $20 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。粘结层的粘聚力模型刚度为 750 N/mm, 法向正应力 t_n 、两个切向剪应力 t_s 和 t_t 均为 1.46 MPa^[5]。

2.2 本构模型

钢管和 PE 管之间的胶层破坏是复合材料的一种典型破坏模式, 合理模拟层间力学特性对准正确预测复杂工况下的管道层间粘结与失效意义重大。本文采用粘聚区模型^[6]模拟衬塑钢管层间的损伤及演化。假设粘结层受到法向正应力 t_n 和两个切向的剪应力 t_s 、 t_t , 则有:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n/T_0 \\ \delta_s/T_0 \\ \delta_t/T_0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式中, $K_i (i = n, s, t)$ 为粘结层三个应力对应的刚度; $\delta_i (i = n, s, t)$ 为粘结层三个应力对应的位移; T_0 为粘结层的初始厚度。

粘结层材料本构模型采用双线性本构(图 1), 包括材料达到强度极限前的线弹性阶段和达到强度极限后的刚度线性降低软化阶段。上升段应力随着位移以初始刚度 K_0 增加; 当位移达到 δ_0 , 粘结层满足初始损伤准则, 粘结层刚度以 $(1 - D)K_0$ 降低。

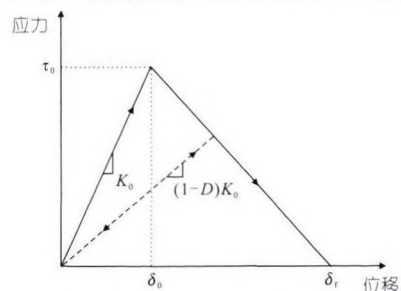


图 1 双线性本构模型

Fig. 1 Bilinear constitutive model

收稿日期: 2018-05-06, 修回日期: 2018-06-08

作者简介: 卢希(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为混凝土耐久性, E-mail: 534172357@qq.com

通讯作者: 高德军(1969-), 男, 副教授, 研究方向为边坡治理与加固, E-mail: gdjds@163.com

$D)K_0$ 下降,其中 D 为粘结层的损伤演化变量;当位移达到 δ_i 处,粘结层满足损伤演化,此时 $D=1$,粘结层粘结失效。

粘结层的初始损伤准则选用最大名义应力准则,即当任何一个名义应力比值达到 1 时,损伤开始,其表达式为:

$$\max\{t_n/t_n^0, t_s/t_s^0, t_t/t_t^0\} = 1 \quad (2)$$

式中, t_i^0 ($i=n, s, t$) 分别为三个方向的接触应力峰值。

在粘结层产生损伤到完全失效的过程中,使用损伤演化变量 D 来退化刚度:

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (3)$$

式中, δ_m^f 为由损伤演化确定的等效位移; δ_m^{\max} 为加载过程中的等效位移; δ_m^0 为由初始损伤准则确定的等效位移。

2.3 接触参数

使用 ABAQUS 在层间建立 cohesive 接触。极限强度通过结合强度试验获取;设置失效位移表征损伤演化,失效位移值在 0.10~0.01 mm 之间调试,当仿真分析得到的力—位移曲线与试验基本吻合,即可校准失效位移。

2.4 模型构建

结合强度试验试件采用 DN50 衬塑钢管,依据《钢塑复合管》(GB/T 28897-2012)^[7] 规定试件尺寸,采用 ABAQUS 软件,建立其有限元模型,单元类型为 C3D8R,见图 2。为真实模拟试验过程,在 PE 管模型上端面耦合一个参考点,向下位移加载 2 mm;试件水平置于测试平台上,测试平台套箍住试件下端面,防止加载时试件在水平方向滑动,因此管下端面设为固定约束。初始损伤准则选用最大名义应力准则,选择基于位移的损伤演化类型,经试算,仿真分析与结合强度试验结果相近时,失效位移、粘性系数分别取为 0.05 mm、0.01。

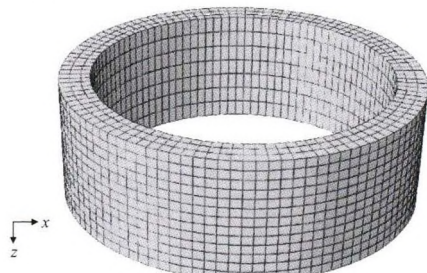


图 2 管段的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of pipe section

衬塑钢管结合强度试验依据《钢塑复合管》(GB/T 28897-2012)^[7] 进行。试件管道外径为 60

mm,衬塑层厚 1.5 mm,钢管层厚 3.5 mm,管段长 20 mm。使用 PWS-E200 电液伺服动静万能试验机进行加载(图 3),算得结合强度为 1.46 MPa,满足不低于 1.00 MPa 的规范要求^[7]。

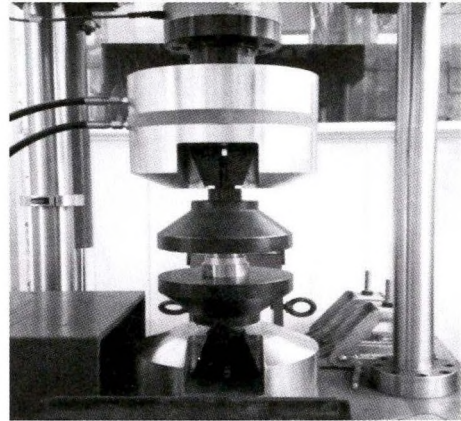


图 3 结合强度试验

Fig. 3 Bond strength test

2.5 模型校准

多次调试失效位移与粘性系数,将有限元分析结果与试验值对比,逐渐校准并确定失效位移与粘性系数。起初失效位移在 0.10~0.01 mm 之间调试,当失效位移设置为 0.05 mm 时,仿真分析所得力—位移曲线见图 4,反力峰值为 4.948 kN,计算对应的结合强度为 1.44 MPa,与试验结果 1.46 MPa 较为吻合,误差为 1.4%。粘性系数设置为 0.01 时计算的收敛性较好。模型的接触面刚度下降率(CSDMG)云图见图 5。当接触面的损伤演化变量等于 1 时,接触面完全失去刚度,层间粘结失效发生剥离。随着位移加载的持续,

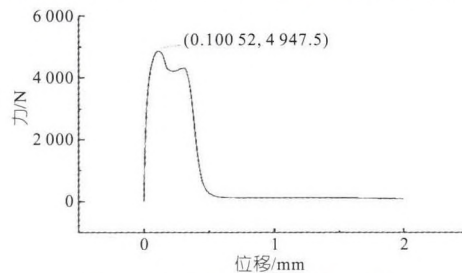


图 4 参考点的力—位移曲线

Fig. 4 The force-displacement curve of the reference point

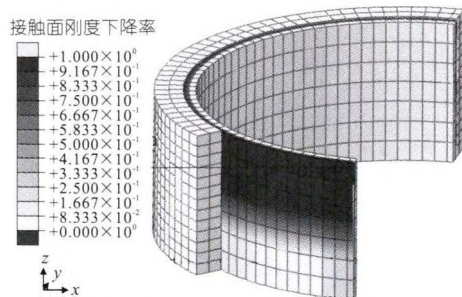


图 5 管段的 CSDMG 云图

Fig. 5 CSDMG of pipe section

粘结层刚度下降区不断向下扩展,直至整个接触面粘结失效。仿真过程与试验观察到的现象一致,从数据和现象上共同校准了参数设置,确保了参数的准确性。

3 管道系统脱粘特性

某工程所在地极端最高气温为 37.7 °C,极端最低气温为 -31.6 °C,管段长 6 m,管道之间采用法兰连接且设有支座。钢管两端面设置固定约束,塑料管与钢管之间建立 cohesive 接触,失效位移、粘性系数分别取 0.05 mm、0.01。定义 -30~50 °C 的温度场模拟降温过程。当温差达到 28 °C 时,管端粘结层发生初始损伤,最边缘处粘结层刚度开始下降,如图 6(a);当温差达到 39 °C 时,最边缘处粘结层损伤演化变量 $D=1$,接触面粘结失效;随着温差的进一步增大,界面损伤不断由管端向中间扩展,当温差达到 80 °C 时,刚度下降深度已扩展至距离管端 37.5 mm 处,粘结失效深度扩展至距管端 30 mm 处,如图 6(b)。损伤扩展的速度随温差变化呈先慢后快的趋势,这是由于当粘结层失效后,PE 管已脱离部分自身的收缩应力加速了粘结层刚度下降区的刚度损失。钢管径

向(S33)应力值达到 197.3 MPa,因此在极端温差下,钢管连接处不易发生破坏。

融沉问题是冻土地区管道铺设常遇到的难题之一。季节性温度变化和管道温度变化会影响管道周边冻土层的温度场分布,从而改变冻土的力学特征,使其发生冻结或融化。管道内介质温度较高时,土体温度升高,冻土层吸收热量逐渐升温开始融化,土层中的冰晶体受热后融化成水,导致管道周围冻土融化下沉,使管道下沉变形,甚至断裂。管道在最不利情况下遭受融沉破坏的计算模型见图 7,由于管道周围土体融沉,管道下部土体完全可能与管道分离,上部土体的荷载由两端支座承担。取埋设管道的细砂土天然重度为 18 kN/m³[8],管道埋深 1.2 m,换算成管道上部承受的均布荷载为 0.021 6 MPa。钢管端部设置固定约束,设定 80 °C 的温差。

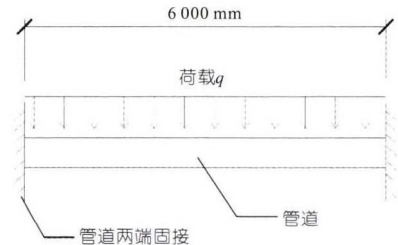


图 7 管道计算模型

Fig. 7 The calculation model of the pipeline

最不利情况下的管道 Mises 应力云图见图 8。由图 8 可知,管端顶部的 Mises 应力最大,达到 727.9 MPa,钢材早已发生塑性破坏,管道连接处已发生破裂,管道中间最大竖向位移为 74.9 mm。因此,当发生最不利情况的融沉破坏时,管道中间不设置支座完全无法满足正常使用要求。

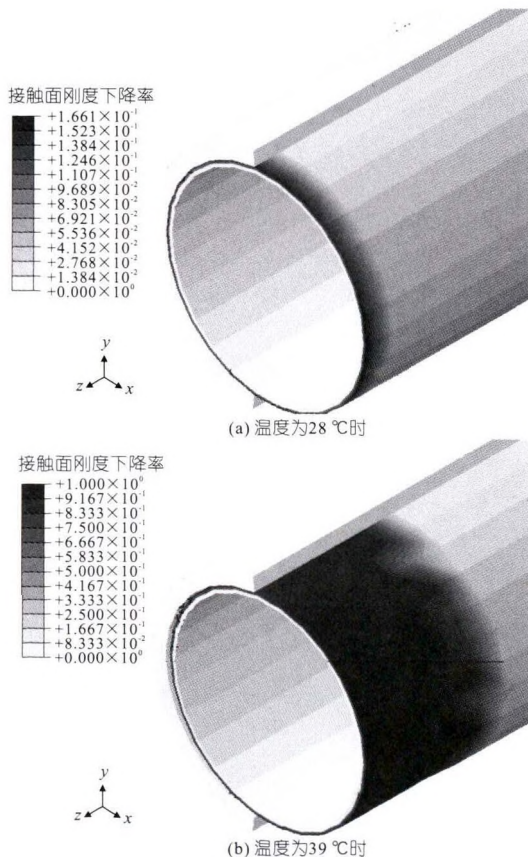


图 6 管端损伤演化过程

Fig. 6 Damage evolution of pipe end

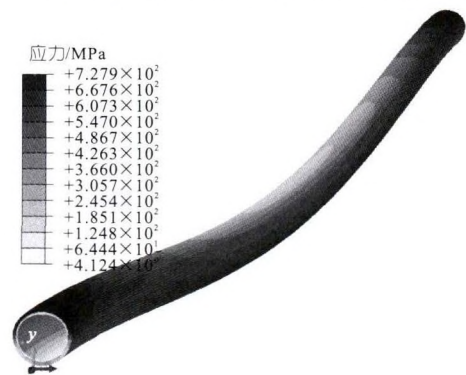


图 8 管道的 Mises 应力云图

Fig. 8 The Mises stress of the pipeline

管道在仅受均布荷载及同时受均布荷载与温差作用时的管端损伤演化见图 9。如图 9(a)管道只受均布荷载作用时,管端两侧粘结层最先发生刚度下降,但并未造成很大损伤,而荷载对钢管挠度及管端连接处的应力影响较大。当同时有荷载

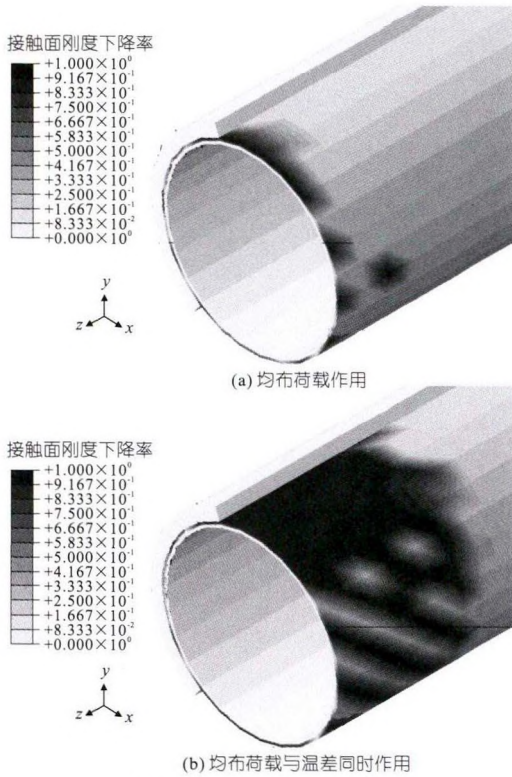


图 9 管端损伤演化过程

Fig. 9 Damage evolution of pipe end

及温差作用时,管端粘结层出现了明显的刚度退化,随着温差增大,管端顶部和底部的粘结层发生大面积的粘结失效;由于挠度变形的影响,两侧出现如图 9(b)的扩展裂纹。管道中部粘结层未出现刚度退化。故温差是影响管端粘结层粘结失效的主要因素,管道上部荷载加速了粘结层刚度退化区的刚度下降。

管道中间等距离添加支座,是实际工程中应对管道发生融沉破坏常采取的手段,对管道中间等距离添加 1~3 个支座的工况进行仿真分析,通过分析数据选取最合适的支座数量,见图 10。由

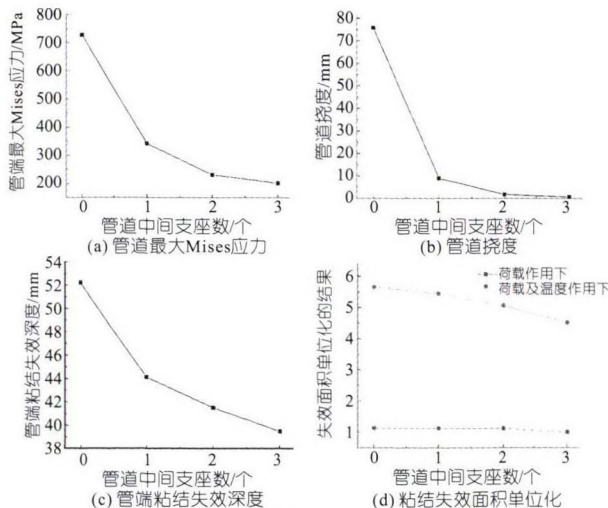


图 10 不同支座数产生的影响

Fig. 10 The impact of different support numbers

图 10(a)~(c)可知,管道中间添加一个支座时,无论是管端最大 Mises 应力、管道挠度还是管端粘结层粘结失效的深度,相对于未添加支座时均大大下降。说明添加支座可有效降低管道发生融沉破坏的可能性,但管端应力仍然较大,钢管连接处容易因应力集中而发生破损。在添加 2 或 3 个支座的情况下,管端应力、管道挠度及管端粘结层失效的深度已下降至不足以导致管道发生破坏的程度。

在荷载与温度耦合作用下,对粘结层粘结失效的面积进行无量纲化处理,见图 10(d)。由图 10(d)可知,单一荷载作用对粘结失效的影响没有荷载与温度耦合作用对粘结失效的影响显著,所以温度是影响粘结层粘结失效的主要因素。增加支座可显著降低荷载与温度耦合作用下粘结失效的面积。由此判断每隔 2 m 设置一个支座,可有效降低管道发生融沉破坏的可能性,同时也最经济。

4 结论

- a. 对于 DN50 钢管,若仅考虑温度作用,当温差为 28 °C 时,管端粘结层发生刚度下降;当温差为 39 °C 时,管端粘结层粘结失效。
- b. 温差是影响管端粘结层粘结失效的主要因素,管外荷载作用会促进粘结层刚度退化。
- c. 为有效控制管道发生融沉破坏,最大支座间距建议为 2 m。

参考文献:

- [1] 王建林. 给水衬塑钢管应用技术探讨[J]. 安装, 2015 (10):36-38.
- [2] 韦旭光. 内衬 PE 钢管层间应力分析[J]. 化工管理, 2016(14):110-113.
- [3] 施建伟. 基于 ABAQUS 复合材料层合板渐进损伤有限元分析[D]. 太原:中北大学, 2015.
- [4] 叶聪杰. 基于 ABAQUS 的复合材料脱胶分析[J]. 江苏科技信息, 2014(14):32-33.
- [5] 《机械工程材料性能数据手册》编委会. 机械工程材料性能数据手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [6] Ridha M, Tan V B C, Tay T E. Traction-separation Laws for Progressive Failure of Bonded Scarf Repair of Composite Panel[J]. Composite Structures, 2011, 93(4):1 239-1 245.
- [7] GB/T28897-2012, 钢塑复合管[S]. 北京:中国标准出版社, 2013.
- [8] 陈情来. 高纬度地区管道建设中的冻土工程地质问题研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2007.

结果 1 更符合研究区水岩相互作用对地下水化学的影响,即 Ca-Na 阳离子交换、方解石矿物沉淀、斜长石矿物及岩盐溶解作用;模型其余输出结果则与实际结果不相符。

4 结论

a. 由补给区到径流区潜水 TH、TDS 逐渐增大,pH 值基本不变,水化学类型沿水流方向呈现出由 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型水向 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水转化的趋势, NO_3^- 受人类活动影响较大。

b. 补给区潜水中主要离子来源于岩盐、碳酸盐和硅酸盐矿物的溶解,主要受岩石风化作用控制;径流区地下水中主要离子来源于岩盐、硅酸盐矿物的溶解,同时受蒸发作用和阳离子交替吸附作用的影响。

c. 研究区潜水水化学类型主要受岩石风化作用控制,同时还受到蒸发浓缩作用和人类活动的影响。

参考文献:

- [1] 肖长来,张力春,方樟,等. 洮儿河扇形地地表水与地下水资源的转化关系[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2006,36(2):234-239.
- [2] 钱会,王焰新,李培月,等. 水文地球化学[M]. 北京:

地质出版社,2005.

- [3] 李白希童,肖长来,李洪武,等. 白城市地下水污染程度评价及现状分析[J]. 水电能源科学,2017,35(9):53-57.
- [4] 冯波. 吉林省西部地下水化学特征演化研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [5] 张艳,吴勇,杨军,等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学,2015,36(9):3 230-3 237.
- [6] 董维红,孟莹,王雨山,等. 三江平原富锦地区浅层地下水水化学特征及其形成作用[J]. 吉林大学学报:地球科学版,2017,47(2):542-553.
- [7] 王大纯,张人权,史毅红. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,1980.
- [8] Subba Rao N, Subrahmanyam A, Ravi Kumar S, et al. Geochemistry and Quality of Groundwater of Gummanampadu Sub-basin, Guntur District, Andhra Pradesh, India [M]// El Pensamiento Utópico De Ignacio Ellacuría. Editorial Académica Española, 2012:1 451-1 471.
- [9] Xing L, Guo H, Zhan Y. Groundwater Hydrochemical Characteristics and Processes along Flow Paths in the North China Plain[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013,70-71(1):250-264.
- [10] 王晓曦,王文科,王周锋,等. 滦河下游河水及沿岸地下水水化学特征及其形成作用[J]. 水文地质工程地质,2014,41(1):25-33,73.
- [11] 王文科. 关中盆地地下水环境演化与可再生维持途径[M]. 郑州:黄河水利出版社,2016.

Chemical Characteristics and Causes of Phreatic Water in Baicheng City

WANG Xin-rui^{a,b}, LIANG Xiu-juan^{a,b}, XIAO Chang-lai^{a,b}, LU Hua^{a,b}

(a. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education;

b. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: To study the chemical characteristics and causes of the phreatic water in Baicheng City, according to the hydrogeological conditions, the study area was divided into two sub-areas that were the recharge area—Taoer river fan land, and the runoff area—plain area except Taoer river fan. Correlation analysis, Piper three-line map, Gibbs map, ion proportional coefficient and reverse geochemical simulation method were used to analyze the chemical causes and influencing factors of the two sub-areas of the study area. The results show that the recharge area was dominated by $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ type water, and the water flow direction gradually converted to $\text{HCO}_3\text{-Na}$ type water in the runoff area, and the TDS gradually increased in the process. Weathering and dissolution of rock salts, silicates, carbonates, and sulphates are the major sources of the ions in phreatic water. The chemical composition of the phreatic water is mainly controlled by the rock weathering, and it is also affected by the alternate cation adsorption, evaporation and enrichment, and human activities.

Key words: groundwater; hydrochemistry; cause analysis; inverse hydrogeochemical simulation

(上接第 83 页)

Interfacial Debonding Analysis of Liner Plastic Compound Pipe in High Temperature Difference Zone

LU Xi¹, XU Gang¹, GAO De-jun¹, ZOU Han-wen²

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Hubei Power Transmission and Distribution Engineering Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: The problem of interlayer debonding was easy to occur for the liner plastic compound pipe buried in high temperature difference zone. The interfacial debonding calculation model of liner plastic compound pipe was established based on cohesive zone model, and the contact parameters were obtained and calibrated by bonding strength experiment. The finite element model of the DN50 liner plastic compound pipe was developed by using this set of parameters, and the behavior of interfacial debonding was analyzed due to the thaw settlement damage. The rationalization proposal of the number of pipe support setting was given, which provides reference for the reliable laying of liner plastic compound pipe in alpine region.

Key words: liner plastic compound pipe; cohesive zone model; finite element analysis; thaw settlement